

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 615 329**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.09.2009 PCT/NL2009/000184**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.03.2010 WO10033018**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.09.2009 E 09741018 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.11.2016 EP 2342453**

54 Título: **Turbina eólica con extremos de inducción baja**

30 Prioridad:

**19.09.2008 NL 2002002**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**06.06.2017**

73 Titular/es:

**CORTEN HOLDING BV (100.0%)  
Kanaaldijk 294  
1831 BH Alkmaar, NL**

72 Inventor/es:

**CORTEN, GUSTAVE, PAUL**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 615 329 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Turbina eólica con extremos de inducción baja

La invención se refiere a la distribución de la cuerda a lo largo de la envergadura de una pala de rotor de una turbina eólica de eje horizontal.

5 Las palas actuales de las turbinas eólicas tienen la desventaja de producir unas cargas altas que aumentan los costes de la energía eólica. En particular, los momentos flectores en los encastrados de las palas son altos. Estas cargas aumentan los costes del área del encastrado de la pala, el buje, los rodamientos de inclinación, etc. Cuando los momentos flectores en el encastrado de las palas del mismo rotor no son iguales, se ejercerán unos momentos de guiñada y cabeceo altos sobre el buje, la góndola, la torre y la cimentación. Otra desventaja de la carga alta de las palas es que la turbina generará un déficit de velocidad grande en la estela. En un parque eólico, las turbinas ubicadas en dichas estelas experimentan una carga alta particularmente en el caso de funcionamiento parcial en una estela. Asimismo, la generación de déficits de velocidad grandes en los parques eólicos reducirá la eficiencia global de un parque eólico de acuerdo con el concepto Flujo y Calor al cual se hace referencia en la sección 2.1.2 en "Flow Separation on Wind Turbine Blades" ISBN 90-393-2582-0 o en el documento US 7357 622 B2. Todas las cargas mencionadas son particularmente altas a aproximadamente una velocidad del viento nominal de la turbina, que es la velocidad del viento mínima a la cual la turbina puede generar su potencia máxima. Otra desventaja de las palas existentes es que se han tenido que tomar medidas para evitar que los extremos golpeen la torre, como resultado de una ráfaga de viento extrema. Dichas medidas son la utilización de unas palas dobladas previamente, la utilización de fibras de vidrio adicionales, el aumento del grosor del perfil aerodinámico o la sustitución de las fibras de vidrio por unas fibras de vidrio más rígidas o por fibras de carbono.

Además, las palas actuales también experimentan cargas altas sometidas a condiciones extremas. Por ejemplo, cuando se detiene la turbina, durante una ráfaga de viento extrema, las cargas desde las palas hasta la cimentación pueden ser muy altas y aumentarán el coste de la turbina.

25 Con un viento aproximadamente nominal, un método conocido para aliviar las cargas se denomina tallado de extremos. En este, las palas se inclinan unos pocos grados hacia el vano, de modo que se reduce la sustentación generada por las palas. Este método reduce ciertas cargas, no obstante, no con certeza: las palas aún pueden desarrollar la sustentación alta cuando cambia la dirección del viento en una ráfaga o cuando falla el sistema de control y la pala se inclina en la dirección incorrecta. Existen muchos métodos activos para aliviar las cargas tal como cambiar la forma de los perfiles aerodinámicos o utilizar actuadores activos para controlar la aerodinámica del perfil aerodinámico. No obstante, estos métodos aumentan la frecuencia de mantenimiento y por tanto los costes. E incluso cuando un control activo reduce exitosamente las cargas un 99.9% del tiempo, el caso muy poco probable de errores en el control puede conducir a un aumento de las cargas más altas. Los diseñadores de turbinas eólicas deben tener en cuenta dichos casos. Tanto el tallado de extremos como dichos métodos activos influyen poco o nada en las cargas extremas cuando se detiene la turbina. Otro método conocido para reducir las cargas es optimizar el rotor a una inducción axial por debajo del valor óptimo de  $a = 1/3$  obtenido por Lanchester en 1915 y denominado a menudo el límite de Betz.

Otro ejemplo de la técnica anterior se puede encontrar en el documento WO2006090215. El objetivo de la invención es superar las desventajas mencionadas anteriormente. Se introducen algunas definiciones. La solidez es una función del radio local  $r$  y se define como  $Nc/(2\pi R)$ . En la presente,  $R$  hace referencia al radio del rotor y  $Nc$  hace referencia a la longitud total de la cuerda de todas las palas en la posición radial  $r$ . Una turbina eólica puede tener palas de longitudes diferentes o puede tener palas que tengan múltiples perfiles aerodinámicos en una posición radial dada. En todos los casos  $Nc$  es igual a la suma de las cuerdas de todos los perfiles aerodinámicos en la posición radial  $r$ . La cuerda  $c$  en la posición radial  $r$  se define como el valor más pequeño de la cuerda en un intervalo de anchura  $c$  alrededor de la posición  $r$ . Cuando un perfil aerodinámico está equipado con un borde posterior flexible, en ese caso las partes que se pueden flexionar durante las condiciones de generación de potencia en más de un 1% de  $c$  no deberían ser incluidas en la cuerda  $c$ . La relación de solidez en una primera posición radial  $r_1$  y en una segunda posición radial  $r_2$  se expresa como  $sol(r_1/r_2)$ . La expresión del tipo de giro rápido significa dedicar la invención a turbinas eólicas modernas con una solidez total de menos de 0.1. La solidez total se define como la suma de las áreas proyectadas de todas las palas del rotor dividida por el área barrida por el rotor.

50 El objetivo de la invención se consigue mediante un rotor de turbina eólica de más de 10 m de diámetro del tipo de giro rápido que tiene una  $sol(r_1/r_2)$ , que es mayor que un número indicado en la tabla a continuación.

	$sol(0.3R/0.5R)$	$sol(0.5R/0.7R)$	$sol(0.7R/0.9R)$
preferida	1.45	1.5	1.5
más preferida	1.5	1.6	1.65
la más preferida	1.6	1.7	1.8

Una pala con la forma de acuerdo con cualquiera de los criterios de  $so(r_1/r_2)$  anteriores tiene las siguientes ventajas: A la relación de velocidades del extremo de aproximadamente la velocidad del viento nominal, la inducción axial inducida por un rotor con dichas palas está cerca de 0.3 en el centro del rotor y es considerablemente menor en posiciones radiales más alejadas. De modo que el centro trabaja cerca del óptimo mientras que la parte exterior está más alejada de ese óptimo. Esto reduce las cargas sobre los extremos de la pala y por tanto reduce los momentos flectores en el encastre de las palas, así como también los momentos de cabeceo y guiñada, etc. Las cargas en los extremos de las palas tienen un mayor impacto en el coste que las cargas en el encastre de las palas por dos razones: primera, el brazo de las fuerzas es mayor, y segunda, la dirección de la fuerza de sustentación es menos tangencial. Únicamente se aprovecha la componente tangencial. Para relaciones de velocidades en los extremos más altas utilizadas, por ejemplo, por debajo de la velocidad del viento nominal, todo el rotor puede trabajar cerca del óptimo de Lanchester-Betz. Un beneficio adicional de una realización de la invención es que la física anterior implica que el coeficiente de potencia a velocidades del viento menores es relativamente alto, de modo que se genere una fracción de energía mayor a velocidades del viento menores. Esto es beneficioso ya que el valor de la energía aumenta con un viento menor, en particular, en áreas con mucha generación de potencia eólica. Otra ventaja es que los extremos trabajan cerca de su sustentación máxima, de modo que una posible ráfaga de viento o error del control no pueden aumentar mucho las cargas. Esto otorga a las palas de acuerdo con la invención una protección pasiva contra las sobrecargas. Otra ventaja de las cargas reducidas en la parte exterior de la pala es que ayuda a mantener el extremo alejado de la torre. Un beneficio adicional es que se puede sustituir un rotor convencional por un rotor de acuerdo con la invención con un mayor diámetro. El nuevo rotor tendrá un rendimiento mayor para el mismo nivel de carga.

En el extremo del encastre, las palas clásicas están optimizadas principalmente con relación a la estructura y mucho menos con relación a la aerodinámica. Como resultado, el centro de la turbina eólica convencional es una "fuga" en el disco del rotor: el aire fluirá a través del centro del rotor desde el lado de barlovento de alta presión hasta el lado de sotavento de baja presión. Este flujo parásito provoca una pérdida de potencia. Cuando  $so(0.1R/0.3R)$  es mayor de 1.0, y en particular mayor de 1.2, y más en particular mayor de 1.4, se dispone en  $0.1R$  de cuerda suficiente para cerrar aerodinámicamente el centro del rotor. En una realización particular de acuerdo con la invención, la inducción es relativamente alta en el centro del rotor y por lo tanto el cierre del centro añade más rendimiento que en el caso de los rotores convencionales. Asimismo, el cierre de la fuga implica que se genera más potencia en el centro del rotor, que es la potencia que da los menores momentos flectores.

Se obtiene un beneficio adicional cuando las 4 relaciones  $so(r_1/r_2)$  diferentes son mayores que los valores indicados:

$so(0.3R/0.5R)$ :	1.45; 1.5; 1.6,
$so(0.5R/0.7R)$ :	1.5; 1.6; 1.7,
$so(0.7R/0.9R)$ :	1.5; 1.65; 1.8,
$so(0.3R/0.9R)$ :	2.0; 2.5; 3.0.

Se obtiene una ventaja adicional cuando la cuerda como función de la posición radial disminuye de manera monótona en al menos un 80% del intervalo radial entre  $0.3R$  y  $0.99R$ .

De acuerdo con una realización de la invención, el rotor está equipado con medios de mejora de la sustentación. Se obtiene una ventaja adicional cuando dichos medios de mejora de la sustentación se colocan en una posición radial mayor de  $0.5R$ , y más en particular mayor de  $0.7R$ , y preferentemente mayor de  $0.9R$ . Los medios de mejora de la sustentación son cambios a un contorno del perfil aerodinámico suave que aumentan el coeficiente de sustentación máximo y que se unen al perfil aerodinámico como elementos independientes o integrados con el perfil aerodinámico. Algunos ejemplos de medios de mejora de la sustentación son los generadores de vórtices, los flaps gurney, los chorros de aire, la succión de la capa límite, los microdispositivos electromecánicos o las superficies de los perfiles aerodinámicos con abultamientos o rebajes o alerones. Los medios de mejora de la sustentación se pueden colocar de manera pasiva o se pueden utilizar de una manera activa, siendo controlados en función de un parámetro calculado o medido.

Se obtiene una ventaja adicional cuando la cuerda local en el intervalo entre  $0.5R$  y  $0.9R$  es menor que lo que sigue de la ecuación  $C=M$ , suponiendo que el coeficiente de sustentación local  $c_l=0.9$ , y en particular  $c_l=1.0$ , y más en particular  $c_l=1.3$ , y preferentemente  $c_l=1.5$ . En la presente,  $C=Nrc_c\lambda/(2\pi R^2)$  es un número de cuerda adimensional y  $M = -1.19 + 9.74C_p - 21.01C_p^2 + 17.5C_p^3$  es una estimación de la pérdida de momento adimensional deducida de  $C_p$ , que es el coeficiente de potencia eléctrica de la turbina. La fórmula para  $M$  se puede utilizar en el caso de que  $C_p$  esté entre  $1/3$  y  $16/27$ .

Cuando las palas del rotor trabajan a menos de un 80% de la velocidad del viento nominal, se obtiene una ventaja adicional si la relación de velocidades del extremo (definida como  $A = \omega R/V$ , donde  $\omega$  es la velocidad angular del rotor y  $V$  la velocidad del viento) del rotor es mayor que la correspondiente a la velocidad del viento nominal en al

menos un 10%, en particular en al menos un 20%, y más en particular en al menos un 30%. Más en particular, la turbina eólica trabaja con una velocidad del rotor constante, de modo que la relación de velocidades del extremo aumente de manera automática al disminuir la velocidad del viento. Las turbinas con velocidad del rotor constante se definen como turbinas que tienen una conexión entre el generador y la red donde la energía no se transfiere por medio de un enlace de tensión CA-CC-CA. A velocidades del viento de menos de un 80% del viento nominal, las cargas son relativamente bajas y no provocan costes altos. Al aumentar la relación de velocidades del extremo todo el rotor puede trabajar cerca del límite de Lanchester-Betz, de modo que se captura la potencia máxima.

Otra ventaja es válida para la eficiencia de los parques eólicos. Si la estela de una turbina en un parque interfiere con las turbinas a sotavento, dicha turbina puede trabajar con una velocidad del extremo menor frente a la curva de velocidad del viento, en comparación con las turbinas cuyas estelas no están interfiriendo. Como resultado, la eficiencia del parque aumenta y la carga de las turbinas se reduce. La relación de velocidades del extremo de una turbina se controla de manera implícita o explícita mediante una función o algoritmo  $\lambda(V)$  que proporciona la relación de velocidades del extremo  $\lambda$  en función de la velocidad del viento  $V$ . En un parque, si una turbina a barlovento está controlada mediante  $\lambda_{up}(V)$  y una turbina a sotavento mediante  $\lambda_{down}(V)$ , en ese caso, para alguna  $V$ ,  $\lambda_{up}(V) \leq \lambda_{down}(V) / f$ , donde  $f$  es 1.05, y en particular 1.1, y más en particular 1.15.

Las realizaciones anteriores de la invención sirven al objetivo de mejorar la relación entre rendimiento y cargas. Este objetivo es de mayor importancia a mayor tamaño de la turbina. Para una turbina pequeña los materiales adicionales para reforzar la estructura tienen un impacto en el coste relativamente pequeño en comparación con los costes de diseño y mantenimiento. No obstante, para grandes turbinas, los ahorros de materiales asociados con el alivio de las cargas son altos. Por lo tanto, se obtiene una ventaja adicional cuando la invención se aplica a turbinas con un diámetro mayor de 80 m, en particular mayor de 100 m, y más en particular mayor de 120 m. Para turbinas menores de 10 m de diámetro la reducción de las cargas es de poca importancia y dichas turbinas no se utilizan en los parques. Por lo tanto, las turbinas de menos de 10 m de diámetro están excluidas de la invención.

Se obtiene un beneficio adicional cuando la turbina de viento de acuerdo con la invención comprende una pala con un perfil aerodinámico en una posición radial mayor de  $0.8R$  del cual el coeficiente de sustentación máximo cuando se retiran cualesquiera medios de mejora de la sustentación, en condiciones bidimensionales con un número de Reynolds en función de la cuerda de 1.5 millones, es mayor de 1.4, y en particular mayor de 1.5, y más en particular mayor de 1.6 y preferentemente mayor de 1.7.

Y, por último, se obtiene un beneficio adicional cuando la turbina eólica de acuerdo con la invención comprende una pala con un perfil aerodinámico en una posición radial mayor de  $0.6R$  del cual el coeficiente de sustentación máximo que incluye los medios de mejora de la sustentación, en condiciones bidimensionales con un número de Reynolds en función de la cuerda de 1.5 millones, es mayor de 1.6, y en particular mayor de 1.7, y más en particular mayor de 1.8 y preferentemente mayor de 1.9.

Las figuras a continuación muestran las realizaciones preferidas de la invención.

- figura 1 turbina eólica;
- figura 2 pala de turbina eólica;
- figura 3 distribución de la inducción.

La figura 1 muestra una turbina eólica 1 con una torre 2, una góndola 3, un buje 4 y una pala 6, con el encastre de la pala 5. El radio de la turbina es  $R$ . La distribución de la cuerda frente a la posición radial es de acuerdo a la invención. La figura 2 muestra el lado de succión de una pala 6 con el encastre de la pala 5. La pala tiene las cuerdas locales 10, 11, 12 y 13 en  $0.3R$ ,  $0.5R$ ,  $0.7R$  y  $0.9R$  respectivamente ( $0.1R$  no aparece explícita en la figura). La pala tiene unos medios de mejora de la sustentación en forma de generadores de vórtices 14, que se muestran a una escala mayor y con números más pequeños por razones de claridad. En la figura, la cuerda 10 dividida por la cuerda 11 es igual a  $so/(0.3R/0.5R)$  y es 1.5. La figura 3 muestra un ejemplo de la inducción axial frente a la posición radial para un rotor de acuerdo con la invención a una velocidad del viento nominal de 11 m/s (curva "a del invento nominal") y con un viento de 8 m/s (curva a del invento 8 m/s). Se puede observar que, en la nominal, la parte exterior del rotor está bastante lejos de  $a = 1/3$  mientras que la parte interior está aún cerca de  $a = 1/3$ . Las relaciones para un diseño actual se muestran mediante las curvas "a nominal" y "a 8 m/s". En este caso nominal, la inducción en la parte exterior del rotor está mucho más cercana a  $a = 1/3$ . Por lo tanto, el rotor actual tendrá un coeficiente de potencia mayor  $C_p$  pero experimentará cargas mayores. El rotor de acuerdo con la invención se puede hacer más grande de modo que capture incluso más energía con cargas menores. Los valores de inducción precisos en el eje y no son relevantes y pueden ser mayores o menores. Lo relevante son las tendencias respectivas en las curvas, que ilustran los principios subyacentes de la invención.

Será obvio para el experto en la técnica, que las figuras y la descripción son meros ejemplos de la invención y que se pueden realizar múltiples variaciones que están dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Una turbina eólica del tipo de giro rápido que comprende un rotor de más de 80 m de diámetro, en el cual la relación de la solidez en una posición radial  $r_1$  y la solidez en una posición radial  $r_2$ ,  $sol(r_1/r_2)$  es tal que  $sol(0.3R/0.5R)$  es mayor de 1.45 y **caracterizada por que**  $sol(0.5R/0.7R)$  es mayor de 1.5.
2. La turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1, donde  $sol(0.5R/0.7R)$  es mayor de 1.6 y más en particular mayor de 1.7.
- 10 3. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que**  $sol(0.7R/0.9R)$  es mayor de 1.5, y en particular mayor de 1.65 y más en particular mayor de 1.8.
4. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que**  $sol(0.5R/0.9R)$  es mayor de 2.0, y en particular mayor de 2.5 y más en particular mayor de 3.0.
- 15 5. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una pala de rotor donde la cuerda como función del radio disminuye de manera monótona en al menos un 80% del intervalo radial entre 0.3R y 0.9R.
6. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una pala de rotor que está equipada con unos medios de mejora de la sustentación, donde dichos medios están ubicados en particular en una posición radial mayor de 0.5R, y más en particular en una posición radial mayor de 0.7R y preferentemente en una posición radial mayor de 0.9R.
- 20 7. Un grupo de turbinas eólicas que comprende una primera y segunda turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, de las cuales dicha primera turbina eólica está a barlovento de dicha segunda turbina y trabaja con una relación de velocidades del extremo que cumple la función  $\lambda_{up}(V)$  y dicha segunda turbina trabaja con una relación de velocidades del extremo que cumple la función  $\lambda_{down}(V)$ , donde  $\lambda_{up}(V) \leq \lambda_{down}(V) / f$ , para  $f = 1.05$ , y en particular  $f = 1.1$  y más en particular  $f = 1.15$ .
- 25 8. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que en el intervalo de velocidades del viento entre un 60% y un 90% de la velocidad del viento nominal tiene un aumento de la relación de velocidades del extremo de al menos un 20% y más en particular, en la cual la relación de velocidades del extremo aumenta linealmente con la velocidad del viento.
- 30 9. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el diámetro es mayor de 100 m y preferentemente es mayor de 120 m.
10. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una pala con un perfil aerodinámico en una posición radial mayor de 0.8R, donde el coeficiente de sustentación máximo de dicho perfil aerodinámico cuando se eliminan cualesquiera medios de mejora de la sustentación, en condiciones bidimensionales con un número de Reynolds de 1.5 millones, es mayor de 1.4, y en particular mayor de 1.5, y más en particular mayor de 1.6 y preferentemente mayor de 1.7.
- 35 11. La turbina eólica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende una pala con un perfil aerodinámico en una posición radial mayor de 0.8R, donde el coeficiente de sustentación máximo de dicho perfil aerodinámico tal como está aplicado que incluye, por tanto, los medios de mejora de la sustentación si están presentes, en condiciones bidimensionales con un número de Reynolds de 1.5 millones, es mayor de 1.6, y en particular mayor de 1.7, y más en particular mayor de 1.8 y preferentemente mayor de 1.9.
- 40

Fig.1



